

Universidad de Medellín

Parámetros explosivos para muestras de carbón (Antioquia, Colombia)*

Rafael Fuentes**
Jorge Molina***
Astrid Blandón****

Recibido: 08/05/2017 • Aceptado: 07/03/2018

<https://doi.org/10.22395/rium.v17n33a1>

Resumen

Mediante análisis próximos (humedad residual, HR, cenizas, Cz, materia volátil, MV, carbono fijo, CF, azufre total, ST y poder calorífico, PC), granulométricos, pruebas de temperatura mínima de ignición en nube (TMIn), límite inferior de explosividad (LIE) y severidad de la explosión (Kmáx); se propone identificar cuál carbón produce el polvo más explosivo.

Para la mayoría de las muestras, la más alta cantidad de volumen de partículas de carbón se encuentra entre los 100 μm y los 200 μm . Para la muestra de Amagá, el volumen de partículas menores de 10 μm es el mayor, lo cual está de acuerdo con los resultados de la TMIn, que es la más baja (400 °C), el menor LIE (30 g/m^3) y el mayor valor Kmáx (176 bar, m/s). Por el contrario, la muestra de Angelópolis presenta una curva muy sesgada hacia tamaños entre los 60 μm y 300 μm , por tanto, su TMIn es la más alta (480 °C) de la zona oriental de la cuenca del Sinifaná y su LIE es bajo 60 g/m^3 , e igualmente presenta el menor valor de Kmáx (106 bar, m/s), así, se observa, que existe una relación directa entre la granulometría y los resultados de severidad y sensibilidad a la explosión.

En general se ve un comportamiento diferente entre las muestras de los municipios de Amagá y Titiribí, especialmente entre el LIE y los resultados de los análisis de MV, CF y PC, con respecto a las demás muestras, lo cual también está de acuerdo con su mayor susceptibilidad a la inflamación y a la explosividad.

Palabras clave: polvo de carbón; explosividad; análisis próximos.

* Proyecto de investigación *Determinación del grado de explosividad del polvo de carbón y cuantificación del contenido de gas metano en los mantos de carbón de la cuenca del Sinifaná*, Gobernación de Antioquia, Sistema General de Regalías, Medellín, 2014-2015.

** Ingeniero de Minas y Metalurgia. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Grupo Materia Orgánica Sedimentaria y Análisis de Imagen. Medellín, Colombia. Calle 65 N.º 78-28, bloque M. Correo electrónico: refuentesc@unal.edu.co. Teléfono: +57+4 5365190. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5132-4289>

*** Ph. D. Ingeniero de Minas y Metalurgia. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Grupo Materia Orgánica Sedimentaria y Análisis de Imagen. Medellín, Colombia. Calle 65 N.º 78-28, bloque M. Correo electrónico: jmmolina@unal.edu.co. Teléfono: +57+4 4255230. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6068-2571>

**** Ph. D. Ingeniera Geóloga. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Grupo Materia Orgánica Sedimentaria y Análisis de Imagen. Medellín, Colombia. Calle 65 N.º 78-28, bloque M. Correo electrónico: asblando@unal.edu.co. Teléfono: +57+4 4255243. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4537-2046>

Explosive Parameters for Coal Samples (Antioquia, Colombia)

Abstract

Through proximate analysis (residual moisture, RM, ashes, As, volatile matter, VM, fixed carbon, FC, total Sulphur, TS and calorific value, CV), granulometric, minimum cloud ignition temperature tests (TMIn), lower explosion limit (LEL) and explosion severity (Kmáx); it is proposed to identify which coal produces the most explosive dust.

For most samples, the highest amount of coal particle volume is between 100 μm and 200 μm . For the Amagá sample, the volume of particles smaller than 10 μm is the largest, which agrees with the results of the TMIn, which is the lowest (400 $^{\circ}\text{C}$), the lowest LEL (30 g/m^3) and the highest Kmáx value (176 bar, m/s). On the contrary, the Angelópolis sample presents a very skewed curve towards sizes between 60 μm and 300 μm , therefore, its TMIn is the highest (480 $^{\circ}\text{C}$) of the Eastern Zone of the Sinifaná basin and its LEL is under 60 g/m^3 , and it also presents the lowest value of Kmáx (106 bar, m/s), thus, it is observed that there is a direct relationship between the granulometry and the results of severity and sensitivity to the explosion.

In general, there is a different behavior between the samples of the municipalities of Amagá and Titiribí, especially between the LIE and the results of the analyses of VM, FC and CV, with respect to the other samples, which is also in agreement with their greater susceptibility to inflammation and explosiveness.

Keywords: coal dust; explosiveness; proximate analysis.

Parâmetros explosivos para amostras de carvão (Antioquia, Colômbia)

Resumo

Por meio de análises próximas — umidade residual (UR), cinzas (Cz), matéria volátil (MV), carbono fixo (CF), enxofre total (ST) e poder calorífico (PC) —, granulométricas, testes de temperatura mínima de ignição na nuvem (MIT), limite inferior de explosividade (LIE) e severidade da explosão (Kmáx), propõe-se identificar qual carvão produz o pó mais explosivo.

Para a maioria das amostras, a quantidade mais alta de volume de partículas de carvão se encontra entre 100 μm e 200 μm . Para a amostra de Amagá, o volume de partículas menores que 10 μm é maior, o que está de acordo com os resultados da MIT, que é a mais baixa (400 $^{\circ}\text{C}$), o menor LIE (30 g/m^3) e o maior valor Kmáx (176 bar, m/s). Por outro lado, a amostra de Angelópolis apresenta uma curva muito inclinada para tamanhos entre 60 μm e 300 μm , portanto sua MIT é a mais alta (480 $^{\circ}\text{C}$) da zona oriental da bacia do Sinifaná e seu LIE é baixo (60 g/m^3) e, igualmente, apresenta o menor valor de Kmáx (106 bar, m/s). Assim, observa-se que existe uma relação direta entre a granulometria e os resultados de severidade e sensibilidade à explosão.

Em geral, nota-se um comportamento diferente entre as amostras dos municípios de Amagá e Titiribí — especialmente entre o LIE e os resultados das análises de MV, CF e PC — com respeito às demais amostras, o que também está de acordo com uma maior suscetibilidade à inflamação e à explosividade.

Palavras-chave: pó de carvão; explosividade; análises próximas.

INTRODUCCIÓN

Debido a la falta de control y conocimiento acerca de los peligros que tiene el polvo de carbón dentro de las minas subterráneas, es importante saber controlar la polución y evitar catástrofes, en especial la pérdida de vidas. Solo hasta el año 2014 se comienza un estudio riguroso de las situaciones de riesgo generadas por el polvo de carbón en la pequeña minería situada en la cuenca del Sinifaná [1]. Otros hechos que motivan a esta publicación son los accidentes ocurridos en esta región [2].

Conocer las propiedades que hacen explosivo al polvo de carbón, identificarlas y saber manejarlas o suprimirlas, permitirá tener un ambiente de trabajo seguro. Del análisis de las explosiones alimentadas por material pulverulento se tiene muy poco registro en Colombia debido a que ha sido un fenómeno muy poco recurrente, pero al momento en que suceden estos desafortunados eventos las consecuencias son catastróficas y mortales [1, 3-6]. Casualmente, dentro de la minería subterránea de carbón se manejan los mayores riesgos en cuanto a explosiones por material pulverulento. El polvo de carbón es un material explosivo, y a la vez omnipresente en las actividades mineras, lo cual lo hace objeto de este estudio.

El avance en la prevención de las explosiones de polvo de carbón en las minas ha sido notable, sin embargo no ha dejado de ser un problema, a veces incontrolable. Algunas empresas encargadas de extraer el carbón cuentan con poca información acerca del manejo del polvo de carbón, lo que dificulta garantizar la seguridad de las personas y reducir los riesgos [4, 7-9]. La caracterización de los parámetros de inflamabilidad dará una herramienta más para poder catalogar o dar una clasificación a los polvos de carbón y así poder determinar cuáles son más explosivos desde el punto de vista químico [10].

La explosión de un combustible en el aire consiste en la oxidación rápida del material, lo cual llega a un aumento de la temperatura y la presión. La violencia de una explosión está relacionada con la tasa de energía liberada por la reacción química, en relación con el grado de confinamiento y la pérdida de calor [11-15].

Como las explosiones de polvo de carbón no son un problema único del país (Colombia), en otros países han expedido una serie de normativas que permiten medir algunos parámetros de las explosiones por material particulado. Así mismo, han creado una serie de reglamentaciones para la prevención de estos eventos. En España, por ejemplo, promulgaron las normas ATEX (para el control de atmósferas explosivas) que establecen pruebas de laboratorio para determinar los límites permisibles de un material particulado dentro de un entorno confinado [16], también identifican las temperaturas mínimas a las cuales explota una nube de polvo [17] e, incluso, le dan categorías al

poder de destrucción que pueda causar una explosión [18]; esto entre muchas más condiciones que permiten tener un entorno de trabajo seguro [19].

1. MÉTODOS

La parte experimental de este estudio consiste en analizar los parámetros relacionados con las características del carbón que influyen en una explosión de material particulado. Para lograr el objetivo se tomaron muestras de canal en cinco minas que pertenecen a la región conocida como la cuenca del Sinifaná en el departamento de Antioquia en Colombia. Se hicieron análisis granulométricos, próximos, pruebas de temperatura mínima de ignición en nube, límite inferior de explosividad y severidad de la explosión.

• Muestreo

Los mantos de carbón presentan variaciones verticales en el contenido y tipo de materia orgánica. Estas variaciones no se tienen en cuenta al momento de extraer el material a superficie, por lo tanto, se empleó la técnica de muestreo de canal para lograr analizar todo el manto de carbón. Esta técnica consiste en obtener un volumen de carbón triturado que incluya todo el espesor del manto mediante un corte uniforme, continuo y perpendicular a la estratificación. Para que la muestra fuera representativa, el muestreo de los mantos de carbón se hizo en el frente de explotación de la mina, garantizando que las condiciones naturales del material estuvieran lo más frescas posibles [1].

• Ensayos de laboratorio

Los ensayos realizados a las muestras de carbón recolectadas no se encuentran disponibles en laboratorios colombianos a excepción de los análisis próximos realizados en el Laboratorio de Carbones de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Los ensayos restantes fueron realizados en el Laboratorio Oficial J. M. de Madariaga (LOM) en España. A continuación, se hace una breve descripción de dichos ensayos [1, 19-21]

1.1 Análisis próximos de carbón

Según la norma [22], estos análisis se definen como el contenido de humedad residual [23, 24], cenizas [25], materia volátil [26] y carbono fijo. Sin embargo, también se realizan los análisis próximos completos, los cuales incluyen la determinación del poder calorífico [27] y el azufre total [28].

1.2 Granulometría

La granulometría es un parámetro crucial para entender el comportamiento de las partículas dentro de una explosión. Una vez preparada la muestra dentro de los laboratorios, el tamaño medio de partícula se mide por difracción láser en vía seca [29].

1.3 Temperatura mínima de ignición en nube (TMIn)

Es la menor temperatura a la que se inicia el proceso de inflamación de una muestra de polvo. Se puede realizar el ensayo con la muestra dispersada en forma de nube (TMIn), de acuerdo a norma UNE-EN 50281-2-1: 1999.

1.4 Límite inferior de explosividad (LIE)

Es la mayor concentración de polvo en suspensión a la que no se registra inflamación y representa el límite para el cual la mezcla aire-polvo es potencialmente explosiva. Esta se hizo bajo la norma UNE-EN 14034-3: 2006.

1.5 Severidad de explosión

Cuando la inflamación de una sustancia se produce en un recinto cerrado, se produce una explosión. Se pueden determinar experimentalmente ciertas características que permiten evaluar las consecuencias de la explosión (severidad de la explosión o explosividad). De esta forma se obtienen los parámetros básicos para el diseño de medidas de protección contra la explosión [19, 21].

La presión máxima de explosión ($P_{m\acute{a}x}$), es la diferencia entre la presión en el instante de la ignición (presión normal) y la presión en el punto culminante de la curva del registro presión-tiempo. La velocidad máxima de aumento de presión con el tiempo $(dP/dt)_{m\acute{a}x}$ se define como la máxima pendiente de la tangente a la curva presión-tiempo a cada concentración nominal de polvo. La constante característica ($K_{m\acute{a}x}$) se obtiene mediante el producto de $(dP/dt)_{m\acute{a}x}$ y la raíz cúbica del volumen del recinto de explosión. En función del valor de $K_{m\acute{a}x}$ se define la clase de explosión, según se indica en la tabla 1.

Estos parámetros ($P_{m\acute{a}x}$ y $K_{m\acute{a}x}$), se determinan en un aparato esférico de 20 litros de capacidad, que tiene una fuente de ignición en su centro geométrico y con un dispositivo de dispersión que asegura una correcta dispersión del polvo en el interior de la cuba, según las normas EN 14034-1: 2004 +A1, 2011 y EN 14034-2: 2006+A1, 2011 respectivamente [19, 21].

Tabla 1. Clase de explosión de polvo en función de $K_{m\acute{a}x}$

<i>Clase de explosión</i>	<i>$K_{m\acute{a}x}$ (m.bar/s)</i>
St0	0
St1	1-200
St2	201-300
St3	> 300

Fuente: elaboración propia

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez conocidos los resultados de las diferentes pruebas o ensayos realizados a las muestras de carbón, se buscó una explicación que permitiera identificar los parámetros que tornan el polvo de carbón sensible a una explosión. Así mismo, se procuró utilizar los análisis próximos realizados por los laboratorios colombianos como una primera herramienta y punto de partida al momento de identificar un polvo de carbón altamente explosivo. En la tabla 2, se relacionan los códigos asignados a las muestras analizadas en España y los códigos asignados a las mismas muestras en el Laboratorio de Carbones de la Universidad Nacional de Colombia.

Tabla 2. Código otorgado por los laboratorios de España y Colombia a las muestras tomadas

<i>Municipios</i>	<i>LOM</i>	<i>Laboratorio de Carbones</i>
Fredonia	UNC - 2	140312
Venecia	UNC - 8	140336
Titiribí	UNC - 14	140341
Angelópolis	UNC - 15	140349
Amagá	UNC - 19	140494

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con Molina y Blandón [5], es necesario tener en cuenta que, a la hora de evaluar los resultados, hay que hacerlo por tipo y rango de carbón, por esa razón se separan los carbones de la zona oriental (Angelopolis, Amagá, Fredonia y Venecia, los cuales se clasifican como subbituminosos) y los de la zona occidental (Titiribí, el cual es bituminoso alto en volátiles C)

2.1 Análisis próximos

La tabla 3 muestra los resultados de los análisis próximos de algunas muestras representativas de cada una de los municipios que conforman la cuenca del Sinifaná.

Tabla 3. Análisis próximos de muestras analizadas

Municipio	Humedad		Cz	MV	CF	CF (lac)	ST	PC
	Res	Total						
Zona oriental								
Angelópolis	9,95	11,92	2,53	40,40	47,12	53,84	0,27	6026
Amagá	8,49	9,79	3,03	42,28	46,20	52,22	0,56	6248
Fredonia	10,11	12,91	4,60	39,98	45,31	53,12	0,32	6055
Venecia	9,34	12,26	7,39	38,71	44,56	53,51	1,48	5760
Zona occidental								
Titiribí	5,78	7,67	3,25	40,75	50,22	55,21	0,65	6722

Res: residual (%); Cz: cenizas (%); MV: materia volátil (%); CF: carbono fijo (%); ST: azufre total (%);

PC: poder calorífico (cal/g); lac: libre de agua y cenizas.

Fuente: elaboración propia

En la figura 1 se puede observar que no hay relación entre la humedad total, el contenido de cenizas y el azufre total. Tampoco hay relación entre la materia volátil, el carbono fijo y el azufre total. Pero sí se nota una variación en el contenido de carbono fijo a medida que se va de norte a sur en la zona oriental de la cuenca (Angelópolis, Amagá, Fredonia y Venecia). Con respecto a la materia volátil y al poder calorífico, se observa que hay una relación directa en la zona oriental, así, a mayor contenido de materia volátil, mayor poder calorífico, y en la zona occidental (Titiribí) también ocurre lo mismo.

Los carbones de mayor calidad (menor porcentaje de cenizas y azufre) se presentan en los municipios de Amagá y Angelópolis, mientras que en los municipios de Venecia y Fredonia se encuentran los de mayor porcentaje de material inerte. Por otro lado, los del municipio de Titiribí se encuentran en un término medio con relación al contenido de cenizas como se ve en la figura 2.

Al comparar los resultados de materia volátil (MV), carbono fijo (CF) y poder calorífico (PC) en base seca libre de humedad y cenizas (lac), se puede observar que la muestra de Amagá es la que tiene mayor porcentaje de MV y aunque tiene el menor

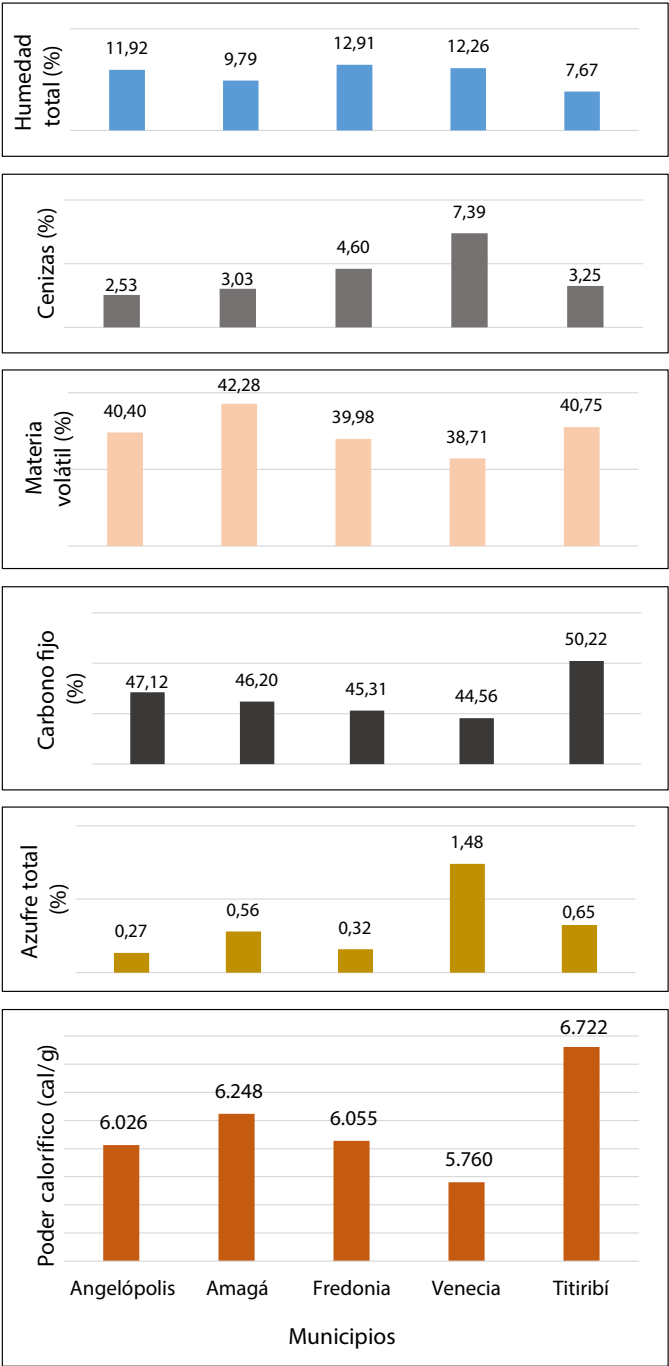


Figura 1. Diferencias entre los análisis próximos de cada una de las muestras analizadas

Fuente: elaboración propia

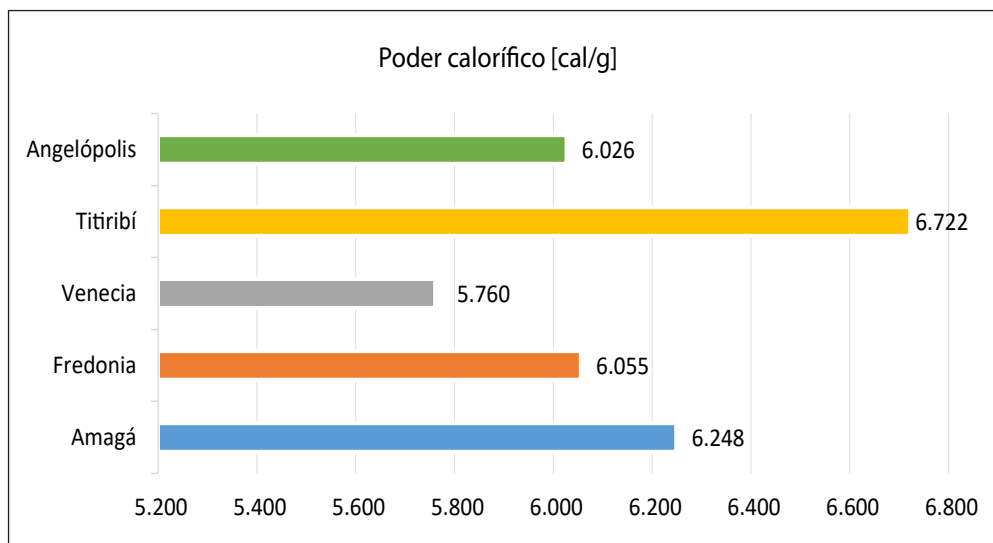


Figura 2. Poder calorífico en cada uno de los municipios

Fuente: elaboración propia

porcentaje de carbono fijo de la zona oriental, no es la que tiene el menor PC, lo que indica que en este caso, las materias volátiles pueden corresponder en gran parte a hidrocarburos y, por lo tanto, la mayor susceptibilidad a la explosión del polvo de carbón de esta muestra. Para el caso de la zona occidental, se nota que la muestra tiene un mayor contenido de CF y mayor poder calorífico, pero no tiene el menor contenido de MV, lo que podría explicar por qué esta muestra que, aunque tiene mayor rango y partículas más grandes, presenta mayor susceptibilidad a la explosión que las otras muestras de la zona oriental.

2.2 Granulometría

Cuando llega la muestra desde la mina al laboratorio se somete a un proceso de molienda con el fin de preparar el carbón para el resto de los ensayos. En las siguientes figuras se ilustran las curvas granulométricas del polvo analizado.

La mayor cantidad de volumen de partículas de carbón, para la mayoría de las muestras, se encuentra entre los 100 μm y los 200 μm (figuras 3 a 7). Para la muestra de Amagá (figura 4), el volumen de partículas menores de 10 μm es el mayor, lo que está de acuerdo con los resultados de la temperatura mínima de ignición en capa que es la más baja (400 $^{\circ}\text{C}$), el menor límite inferior de explosión (30 g/m^3) y el mayor valor de la constante característica ($K_{\text{máx}} = 176 \text{ bar, m/s}$), al respecto, ver tabla 4.

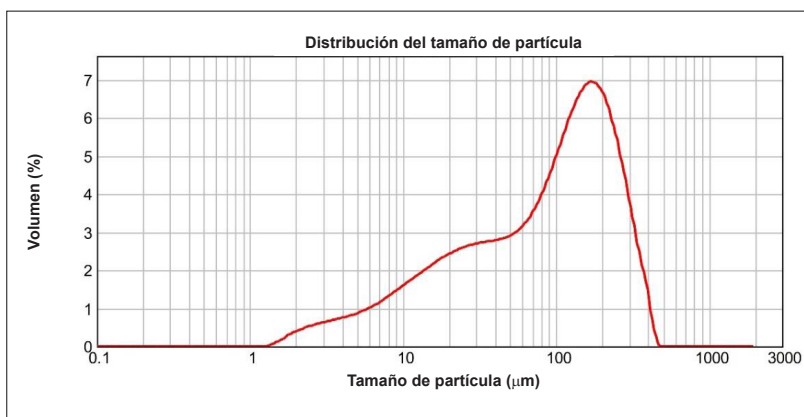


Figura 3. Curva granulométrica, muestra de Angelópolis (UNC-15)

Fuente: [21].

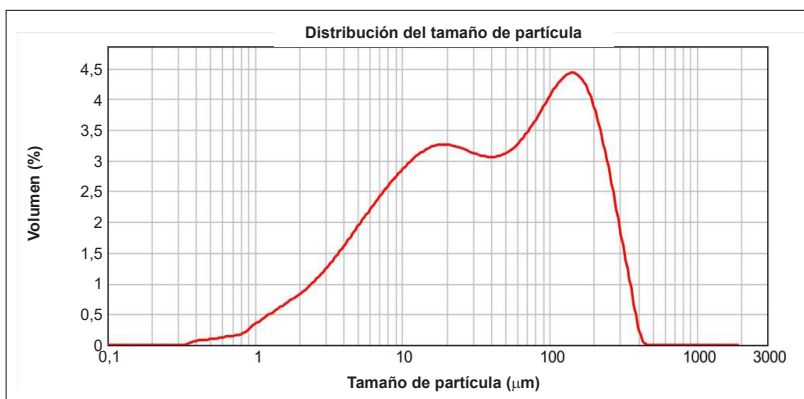


Figura 4. Curva granulométrica, muestra de Amagá (UNC-19)

Fuente: [21].

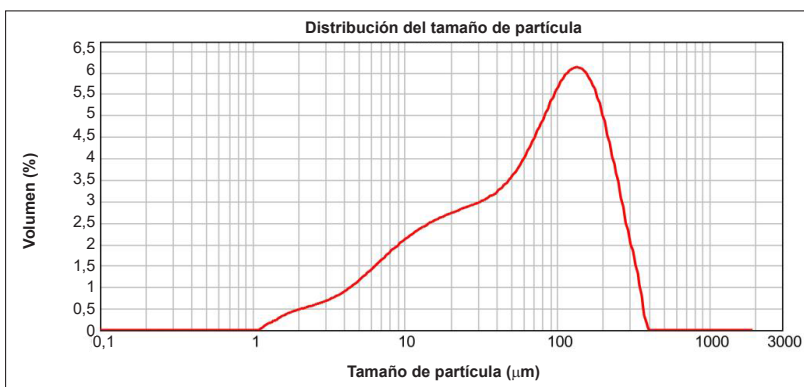


Figura 5. Curva granulométrica, muestra de Fredonia (UNC-2)

Fuente: [21]

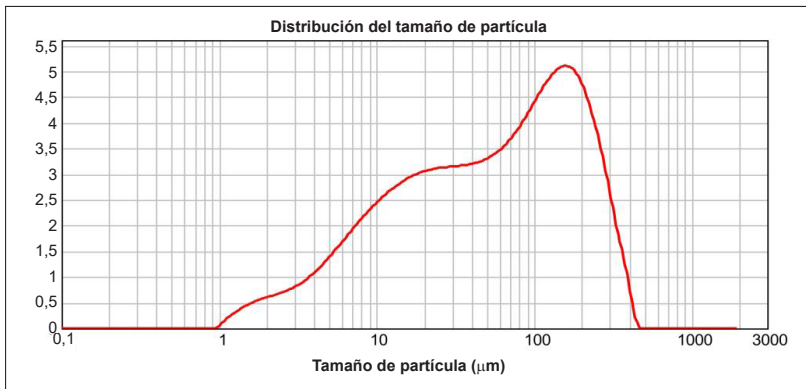


Figura 6. Curva granulométrica, muestra de Venecia (UNC-8)

Fuente: [21].

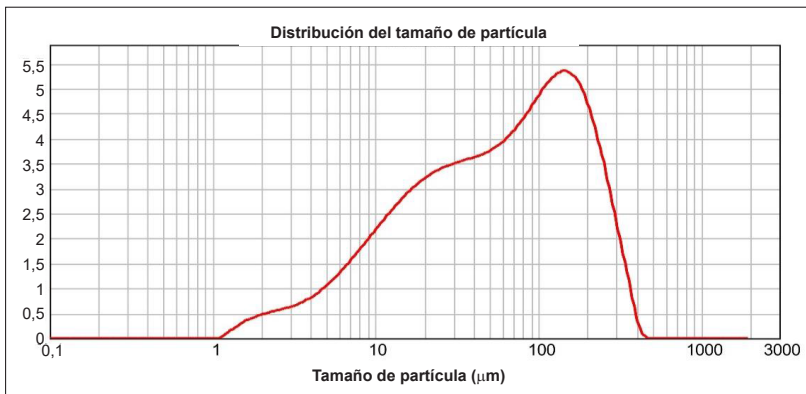


Figura 7. Curva granulométrica, muestra de Titiribí (UNC-14)

Fuente: [21].

Por el contrario, la muestra de Angelópolis presenta una curva muy sesgada hacia tamaños entre los 60 μm y 300 μm (figura 3), por tanto, su temperatura mínima de ignición en capa es la más alta (480 $^{\circ}\text{C}$), de la zona oriental de la cuenca del Sinifaná y su límite inferior de explosividad es bajo 60 g/m^3 , e igualmente presenta el menor valor de la constante característica $K_{\text{máx}} = 106 \text{ bar, m/s}$ (ver tabla 4). Lo anterior se debe a que la transferencia de energía en partículas de estos tamaños es más lenta. Por tanto, se observa que existe una relación inversa entre la granulometría y los resultados de severidad y sensibilidad a la explosión. Además, se comprueban los resultados obtenidos por [5, 6, 10, 20], en donde se demuestra que el tamaño de grano es uno de los parámetros más influyentes en la explosividad del polvo de carbón ya que, a menor tamaño de grano, el porcentaje de inertización puede ser mayor al 80 %.

Para la zona occidental de la cuenca solo se tiene la muestra de Titiribí cuyo carbón tiene un rango un poco mayor (bituminoso alto en volátiles C), razón por la cual, a pesar de tener una granulometría relativamente gruesa y una temperatura mínima de ignición en capa de 510 °C, el límite inferior de explosividad es de 30 g/m³ y la constante característica es relativamente alta (148 bar, m/s), lo que hace que el polvo de carbón sea explosivo, además se comprueba que el poder calorífico es un factor importante a la hora de evaluar el potencial de explosividad del polvo de carbón, tal como concluyeran [5, 10].

2.3 Análisis de severidad y sensibilidad

Algunas propiedades físico-químicas, las cuales indican qué tan sensible es una partícula de carbón al reaccionar ante un estímulo inducido, se revisan a la temperatura mínima a la cual se debe exponer una nube de polvo de carbón para que esta inicie una reacción en cadena, las cantidades mínimas que deben encontrarse en un lugar determinado para que exista una explosión y, por último, qué tanto poder destructivo pueden desatar.

Tabla 4. Resultados de severidad y sensibilidad

<i>Municipio de la muestra</i>	<i>TMIn (°C)</i>	<i>LIE (g/m³)</i>	<i>Kmáx (bar,m/s)</i>
Angelópolis	480	60	106
Amagá	400	30	176
Fredonia	450	60	153
Venecia	430	60	121
Titiribí	510	30	148

TMIn: temperatura mínima de ignición en nube; LIE: límite inferior de explosividad; Kmáx: la constante característica.

Fuente: elaboración propia

Las muestras que necesitan de una mayor temperatura para que se inicie una explosión dentro de una nube de polvo, son las de Angelópolis y las de Titiribí con 480 °C y 510 °C respectivamente. Esto es un poco contradictorio con lo esperado debido a que estas son las muestras con mayor porcentaje de carbono fijo encontrado, lo cual indica que hay otras variables a tener en cuenta. De otro lado, se demuestra que, para poder definir el mayor o menor grado de explosividad de las partículas de carbón, es necesario hacerlo de acuerdo al rango, así, por ejemplo, se agrupan en el rango de los subbituminosos los carbones de Amagá, Fredonia, Venecia y Angelópolis como los de la zona oriental de la cuenca, y en el rango de bituminosos altos en volátiles C, los de Titiribí, como de la zona occidental de la cuenca. Igualmente se comprueba que el

poder calorífico y el tamaño de partícula son parámetros importantes a tener en cuenta, es decir que no se deben comparar carbones con diferente rango, como lo demostraron Blandón *et al.* en 2015.

Las muestras pertenecientes a los municipios de Amagá y Titiribí son las que necesitan de menos cantidad de material particulado acumulado dentro de un recinto cerrado para iniciar una explosión, ya que solamente requieren de la mitad de la concentración en comparación con el resto.

La muestra de Amagá es la más sensible al momento de generar una explosión, por lo tanto, genera más violencia explosiva y provocaría un mayor poder destructivo que el resto de las muestras. A pesar de ser la de mayor $K_{m\acute{a}x}$, (176 bar, m/s) se cataloga como ST1, en comparación con otros tipos de materiales (por ejemplo; polvos metálicos), su poder destructivo sería bajo, pero en realidad, en la mina y bajo las condiciones de confinamiento, alta temperatura y posible presencia de metano, se vuelve muy peligroso.

2.4 Relación entre análisis próximos y los de inflamabilidad y explosividad

Al relacionar la temperatura mínima de inflamación en nube con los análisis de MV, CF y PC, se nota que para la muestra de Amagá esta relación es inversa, es decir que a mayor MV, CF y PC, menor es la temperatura mínima de inflamación en nube, mientras que para las muestras de los demás municipios es directa (ver figuras 8 a 10).

Para el caso de la relación entre el límite inferior de explosividad y los resultados de los análisis de MV, CF y PC, se observa una relación inversa para el caso de la muestra de Amagá y Titiribí, en donde a mayor MV, CF y PC, menor es el límite inferior de explosividad, mientras que, para las demás muestras, aunque la relación es inversa, a menor MV, CF y PC, mayor es el LIE (ver figuras 11 a 13).

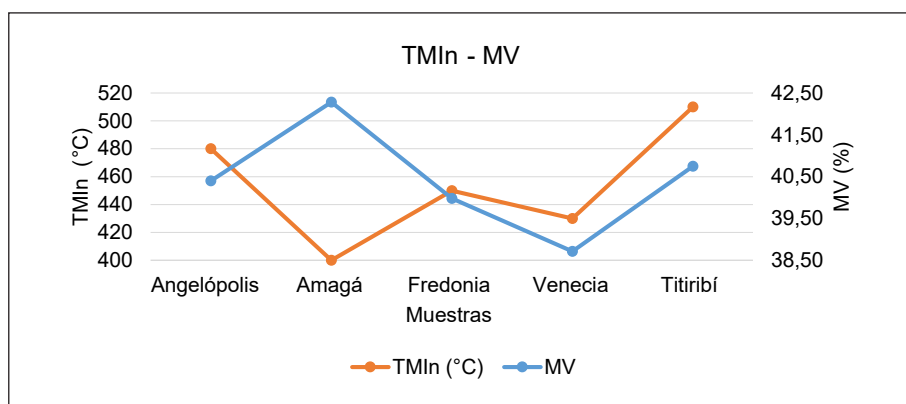


Figura 8. TMIn–materia volátil

Fuente: elaboración propia

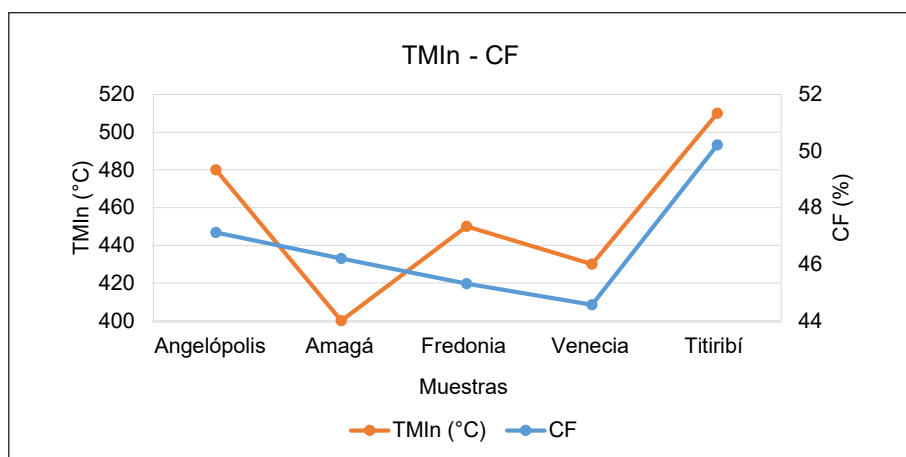


Figura 9. TMIn-carbono fijo

Fuente: elaboración propia

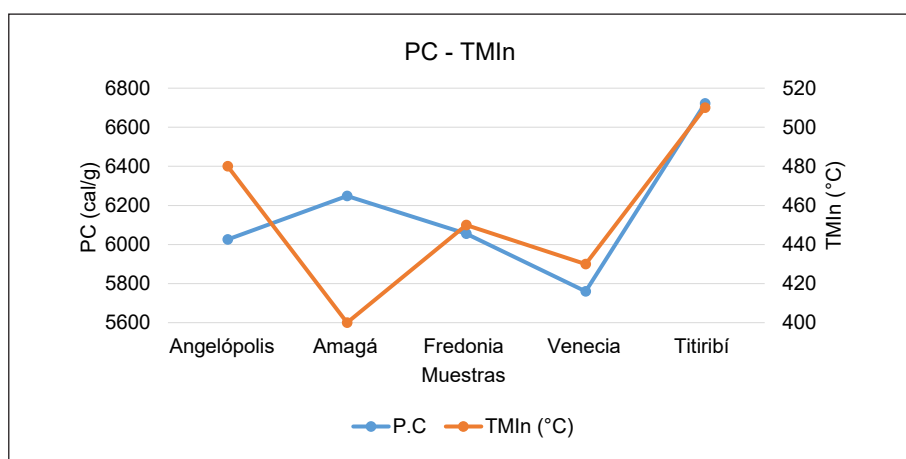


Figura 10. Poder calorífico-TMIn

Fuente: elaboración propia

La relación entre MV, CF y PC entre MV y $K_{\text{máx}}$ es directa, y con respecto a CF y PC es un poco inversa en las muestras de Angelópolis y Titiribí, mientras que para las de los otros municipios es directa, de tal modo que, a menor CF y PC, mayor es el $K_{\text{máx}}$ (ver figuras 14 a 16).

De lo anterior se puede decir que, en general, se ve un comportamiento diferente entre las muestras del municipio de Amagá y Titiribí, especialmente entre el límite inferior de explosividad y los resultados de los análisis de MV, CF y PC con respecto a las demás muestras, lo cual también está de acuerdo con su mayor susceptibilidad a la inflamación y explosividad.

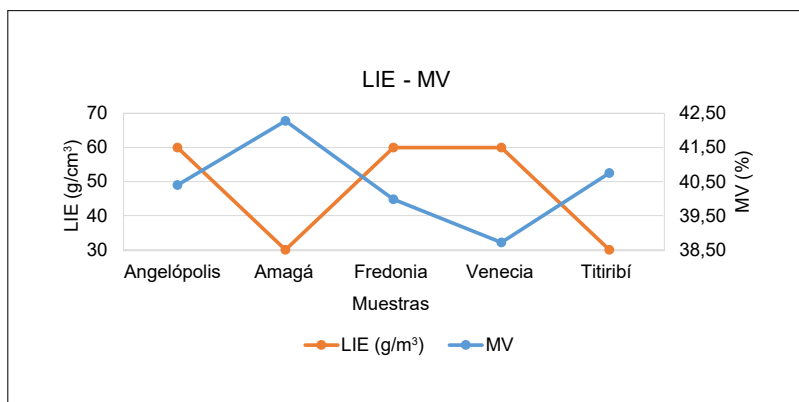


Figura 11. Límite inferior de explosividad–materia volátil

Fuente: elaboración propia

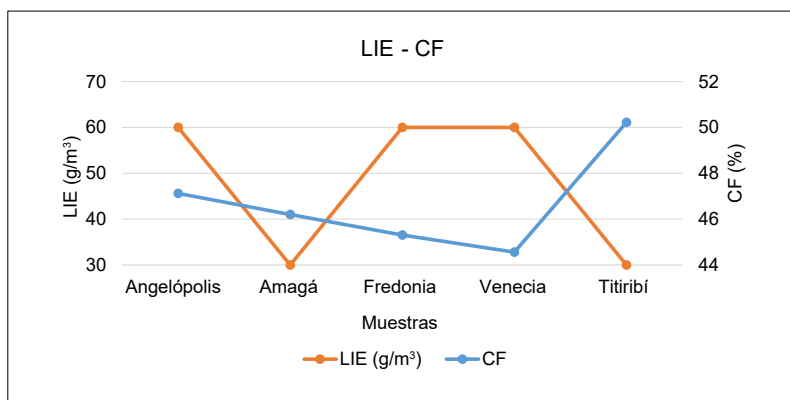


Figura 12. Límite inferior de explosividad–carbono fijo

Fuente: elaboración propia

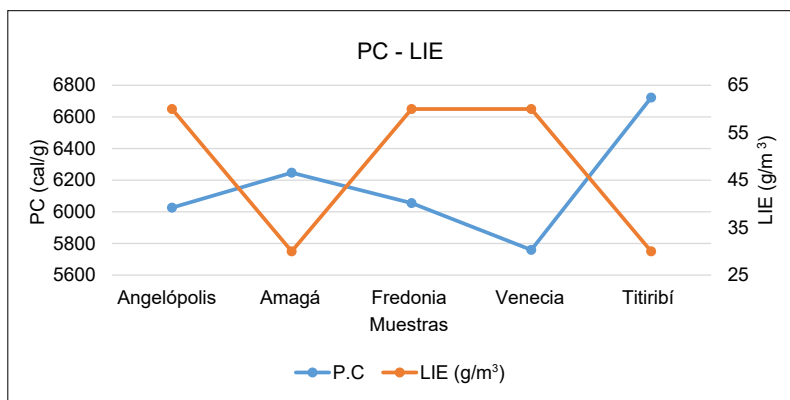


Figura 13. Poder calorífico–límite inferior de explosividad

Fuente: elaboración propia

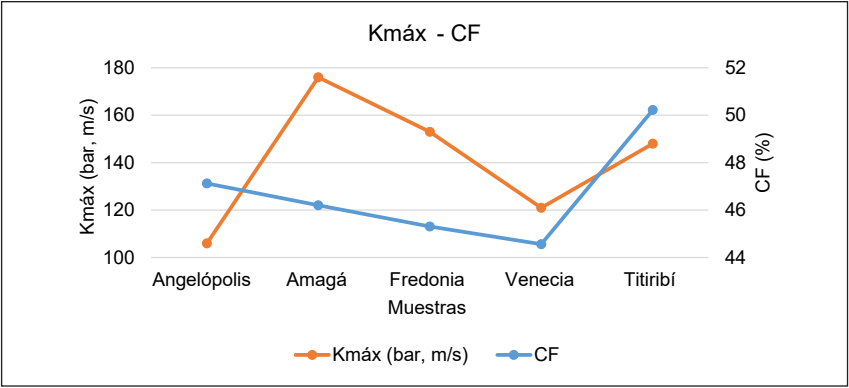


Figura 14. Kmáx-carbono fijo
Fuente: elaboración propia

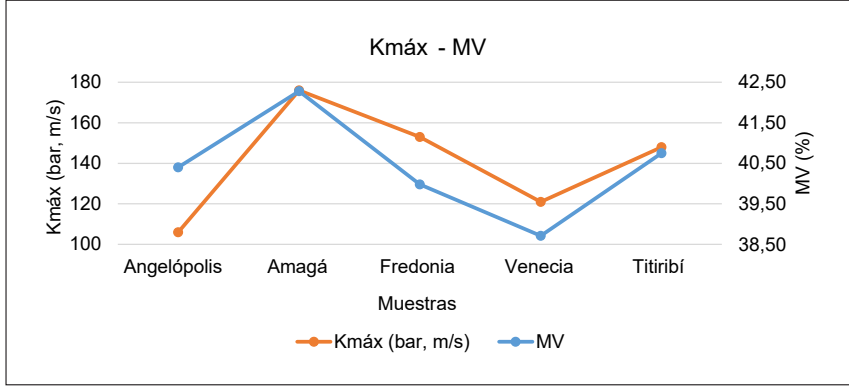


Figura 15. Kmáx-materia volátil
Fuente: elaboración propia

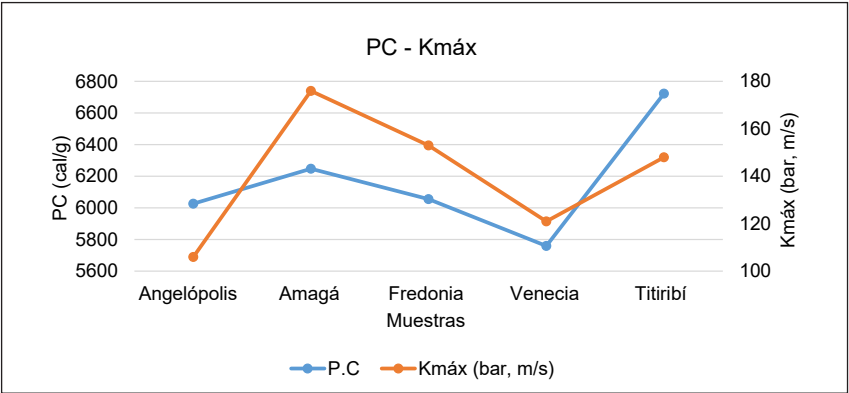


Figura 16. Poder calorífico-Kmáx
Fuente: elaboración propia

3. CONCLUSIONES

Los carbones estudiados se clasifican como subbituminosos y bituminosos altos en volátiles C.

De las muestras analizadas, las que presentan menor porcentaje de cenizas son las de los municipios de Amagá y Angelópolis, seguidas por las del municipio de Titiribí y, por último, las de Venecia y Fredonia.

Para la mayoría de las muestras, la mayor cantidad de volumen de partículas de carbón se encuentra entre los 100 μm y los 200 μm . Para la muestra de Amagá, el volumen de partículas menores de 10 μm es el mayor, lo cual está de acuerdo con los resultados de la temperatura mínima de ignición en capa que es la más baja (400 °C), el menor límite inferior de explosión (30 g/m^3) y el mayor valor de la constante característica ($K_{\text{máx}} = 176 \text{ bar, m/s}$).

Por el contrario, la muestra de Angelópolis presenta una curva muy sesgada hacia tamaños entre los 60 μm y 300 μm , por tanto, su temperatura mínima de ignición en capa es la más alta (480 °C) de la zona oriental de la cuenca del Sinifaná y su límite inferior de explosividad es bajo 60 g/m^3 , e igualmente presenta el menor valor de la constante característica $K_{\text{máx}} = 106 \text{ bar, m/s}$, así, se observa que existe una relación directa entre la granulometría y los resultados de severidad y sensibilidad a la explosión.

Para la zona occidental de la cuenca, solo se tiene la muestra de Titiribí cuyo carbón tiene un rango un poco mayor (bituminoso alto en volátiles C), razón por la cual, a pesar de tener una granulometría relativamente gruesa y una temperatura mínima de ignición en capa de 510 °C, el límite inferior de explosividad es de 30 g/m^3 y la constante característica es relativamente alta (148 bar, m/s).

Las muestras que necesitan de una mayor temperatura para que se inicie una explosión dentro de una nube de polvo, son las de Angelópolis y las de Titiribí con 480 °C y 510 °C respectivamente. Esto es un poco contradictorio con lo esperado debido a que estas son las muestras con mayor porcentaje de carbono fijo encontrado, lo cual indica, que hay otras variables a tener en cuenta, como es el caso del tamaño de las partículas.

Las muestras que necesitan de menos cantidad de material particulado acumulado dentro de un recinto cerrado para iniciar una explosión son las pertenecientes a los municipios de Amagá y Titiribí, estos dos carbones necesitan solamente la mitad de la concentración en comparación con el resto.

La muestra de Amagá es la más sensible al momento de generar una explosión, por ende genera más violencia explosiva y podría provocar un mayor poder destructivo que el resto de las muestras.

El contenido de carbono fijo dentro de las partículas de carbón influye de forma notoria en el LIE, es decir, son propiedades directamente proporcionales, mientras que los contenidos de azufre y materia volátil también pueden influir de forma directa en el TMI_n y el K_{máx}.

REFERENCIAS

- [1] Universidad Nacional de Colombia, *Determinación del grado de explosividad del polvo de carbón y cuantificación del contenido de gas metano en los mantos de carbón de la cuenca del Sinifaná*, Medellín: Gobernación de Antioquia, 2014.
- [2] T. Abbasi y S. A. Abbasi, "Dust explosions-cases, causes, consequences, and control," *J. Hazard. Mater.*, vol. 140, N.º 1, pp. 7-44, 2007.
- [3] W. Cybulski, Coal dust explosions and their suppression, Bureau of Warsaw, Varsovia, Foreign, Special Science, Currency Program, Information, 1975.
- [4] A. Jiménez, M. A. Alfonso, V. Aguirre, E. F. Morales, J. Martínez, R. Sguerra, J. M. J. Navarro y M. Alzate, "Informe preliminar de la investigación del accidente fatal de 73 trabajadores sucedido el miércoles 16 de junio de 2010 en la Mina San Joaquín título 11338 beneficiario Carbones San Fernando, Ubicada en el municipio de Amaga, (vereda Paso Nivel) Antioquia," Ministerio de Minas, pp. 4-5, Bogotá, 2010.
- [5] J. Molina y A. Blandón, "Evidencias del choque térmico en partículas de polvo después de una explosión en minería de carbón," *Revista Ingeniería y Competitividad*, vol. 16, N.º2, pp. 23-33, 2014.
- [6] Casas, A. Blandón y J. Molina, "Evaluación de los parámetros para determinar el grado de explosibilidad del polvo de carbón," *Boletín Ciencias de la Tierra*, N.º36, pp. 42-54, 2014.
- [7] Ministerio de Minas y Energía, "Política Nacional de Seguridad Minera," Bogotá, Dirección de Minas, 2011, pp. 13-17.
- [8] P. Amyotte, "Some myths and realities about dust explosions," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 92, N.º4, pp. 292-299, 2014.
- [9] J. D. McAteer, "Upper Big Branch The April 5, 2010, explosion: a failure of basic coal mine safety practices," Report to the Governor, Governor's Independent Investigation Panel, Virginia del Este, 2011.
- [10] J. García-Torrent, N. Fernández-Anez, L. Medic-Pejic, A. Blandón-Montes y J. M. Molina-Escobar, "Ignition and explosion parameters of Colombian coals," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 43, pp. 706-713, 2016.
- [11] K. L. Cashdollar, "Coal dust explosibility," *Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 9, N.º 1, pp. 65 - 76, 1996.
- [12] J. Michelis, B. Margenburg, G. Müller y a. W. Kleine, "Investigations into the buildup and development conditions of coal dust explosions in a 700-m underground gallery," de *Industrial*

- Dust Explosions, ASTM STP 958*, Filadelfia, American Society for Testing and Materials, 1987, pp. 124 - 137.
- [13] P. Amyotte y E. R., "Dust explosion causation, prevention and mitigation: An overview," *Journal of Chemical Health and Safety*, vol. 17, N.º 1, pp. 15–28, 2010.
- [14] A. García, A. Di Benedetto, P. Russo, E. Salzano y R. Sanchirico, "Dust/gas mixtures explosion regimes," *Powder Technology*, vol. 205, N.º 1–3, pp. 81–86, 2011.
- [15] L. Qingming, B. Chunhua, L. Xiaodong, J. Li y D. Wenxi, "Coal dust/air explosions in a large-scale tube," *Fuel*, vol. 89, N.º 2, pp. 329–335, 2010.
- [16] BSI Group, British Standards Institution, EN 14034-3, 2006+A1, *Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds. Determination of the Lower Explosion Limit LEL of Dust Clouds*, 2011.
- [17] BSI Group, British Standards Institution, EN 50281-2-1, *Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust - Part 2-1: Test methods - Methods for determining the minimum ignition temperatures of dust*, 1998.
- [18] BSI Group, British Standards Institution, EN 14034 - 1, 2004+A1, *Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds. Determination of the Maximum Explosion Pressure Pmax of Dust Clouds*, 2011.
- [19] Directivas ATEX (atmósfera explosiva), *Guía técnica para a seguridad y salud en atmósferas explosivas*, Madrid, pp.41-108, 2003.
- [20] K. Baquero, A. Blandón y J. Molina, "Analysis of the factors that affect in the explosibility of coal dust in underground mines," *Ing. y Compet.*, vol. 14, N.º 2, pp. 147–160, 2012.
- [21] Laboratorio Oficial J.M. Madariaga, LOM, "Caracterización de parámetros explosivos para muestras de polvo de carbón (LOM 14SOLI8175)," Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2014.
- [22] ASTM International, American Society for Testing and Materials, ASTM D3172 - 13, *Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke*, 2013.
- [23] ASTM International, American Society for Testing and Materials, ASTM D3302M - 15, *Standard Test Method for Total Moisture in Coal*, 2015.
- [24] ASTM International, American Society for Testing and Materials, ASTM D3173 - 11, *Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*, 2011.
- [25] ASTM International, American Society for Testing and Materials, ASTM D3174 - 12, *Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke*, 2012.
- [26] ISO, International Organization for Standardization, ISO 562, *Volatile matter in the analysis sample of coal and coke*, 3.^a ed., 2010.
- [27] ASTM International, American Society for Testing and Materials, ASTM D5865 - 13, *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke*, 2013.

- [28] ASTM International, American Society for Testing and Materials, ASTM D4239 - 14, *Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion*, 2014.
- [29] M. Frías, M . P. de Luxan, M. I. Sánchez de Rojas , “Espectrometría de difracción por rayos laser,» *Materiales de construcción*, vol. 38, N.º 212, pp. 37-52, 1988.